

## 水平连铸中间包内钢水流动的水模型研究

杨树峰<sup>1</sup> 李京社<sup>1</sup> 唐海燕<sup>1</sup> 石少清<sup>1,2</sup>

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2 衡阳钢管公司技术中心, 衡阳 421001)

**摘要** 依据实际  $\Phi 120$  mm 圆坯水平连铸过程中 15 t 中间包原型, 采用模型与原型之间 1:1.5 的相似比建立了水模拟系统, 对原型中间包内钢液的流场进行了评估, 并研究了中间包控流装置对中间包内钢液流动特性影响。结果表明, 使用湍流控制器能显著降低中间包中死区比例, 但对最小停留时间延长有限; 使用导流槽和低坝显著延长钢水在中间包内停留时间, 促进夹杂物上浮。

**关键词** 水平连铸 中间包 水模型 控流装置

### A Study on Water Modeling of Fluid Flow in a Tundish for Horizontal Continuous Casting

Yang Shufeng<sup>1</sup>, Li Jingshe<sup>1</sup>, Tang Haiyan<sup>1</sup> and Shi Shaoqing<sup>1,2</sup>

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Hengyang Steel Tube Co Ltd, Hengyang 421001)

**Abstract** According to actual 15 t tundish for casting  $\Phi 120$  mm pipe billet by horizontal continuous caster, the 1:1.5 water model system has been established to examine the flow field in local tundish and study the effect of flow control device on behavior of liquid flow in tundish. Results showed that the dead zone ratio in tundish obviously decreased by using turbulence inhibitor, but it was limited to prolong the minimum residence time; the residence time of liquid steel in tundish obviously increased by using inlet launder and low dam to promote the inclusions floating.

**Material Index** Horizontal Continuous Casting, Tundish, Water Modeling, Flow Controlling Device

本实验通过水力学模拟, 研究了水平连铸中间包<sup>[1,2]</sup>内安装控流装置(湍流控制器和导流槽)对钢水流动的影响。

#### 1 实验方法

依据相似原理, 在几何相似和动力学相似(Froude 准数相似,  $Fr = U^2/gL$ )的条件下, 以模型与原型 1:1.5 的相似比( $\lambda = 0.67$ )建造有机玻璃水模型研究水平连铸中间包内钢水的流动。依据 Froude 准数相似  $Fr_m = Fr_p$ , 其相似条件为:

$$\text{长度: } L_m = \lambda L_p = 0.67 L_p$$

$$\text{速度: } U_m = \lambda^{0.5} U_p = 0.82 U_p$$

$$\text{流量: } Q_m = \lambda^{2.5} Q_p = 0.36 Q_p$$

实际连铸生产过程中, 15 t 中间包为两流, 拉速 3 m/min, 圆坯直径 120 mm。中间包原型和水模型的参数见表 1。

实验装置和实验过程如同文献[3], 根据 Ahuja 等人提出的模型<sup>[4]</sup>计算出中间包内死区、活塞流和全混流的体积分数  $V_d$ 、 $V_p$ 、 $V_m$ 。本文讨论了 3 种水

表 1 中间包原型与模型对应的工艺参数

Table 1 Process parameters of original and modeling tundish

| 项目   | 工艺参数  |      |
|--|-------|------|
|  | 原型    | 模型   |
| 单个水口流量/( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 4.41  | 1.6  |
| 水口流速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )    | 0.64  | 0.52 |
| 工作液面/mm                                    | 1 400 | 933  |
| 两流出口间距/mm                                  | 1 200 | 800  |
| 水口插入液面深度/mm                                | 350   | 230  |

平连铸中间包内钢水的流动(图 1)。

#### 2 实验结果与讨论

##### 2.1 原型中间包流场的评价

各种方案的停留时间分布(RTD), 曲线和停留时间的分析结果见图 2 和表 2。对于原型中间包, 从原型的 RTD 曲线图 2 以及混合模型的结果表 2 可以看出:(1)最小停留时间最短只有 9 s, 即从示踪剂加入到出口检测到信号的间隔时间只有 9 s, 形成了短路流;(2)曲线变化非常急剧, 很快达到峰值然后又迅速减小。造成钢液在中间包的停留时间

短,不利夹杂物上浮。

## 2.2 包底湍流控制器对中间包钢液流动的影响

如表2所示,中间包底部安装湍流控制器后测得的最小停留时间和峰值较原型都有所改进,分别为27 s和47 s。实际平均停留时间从原型的798 s增加到876 s;死区体积得到很大的改进,从原型的40.40%减小到32.97%。湍流控制器明显缓冲了注流钢液的对水口的冲击程度,同时增加了垂流流动,减少了短路流,即有利于夹杂物的上浮,又减少了钢液对中间包壁的冲刷。由图2可以看出,安装湍流控制器后,RTD曲线的走势趋于平缓。

## 2.3 导流槽对水平连铸中间包内钢液流动的影响

当使用导流槽和低坝时,从图2和表2可以看出钢液在中间包的RTD曲线更接近正态分布,最小停留时间和平均停留时间延长,死区比例减少。最小停留时间延长主要是因为注入点到水口之间的距离变大了,而且二者之间放有低坝阻止了钢液直接流向水口避免了短路流。

## 3 结论

(1)原型水平连铸中间包内存在明显的短路流,中间包底部钢液流速较大,对中间包壁及出口冲刷较大;滞止时间和实际平均停留时间较短,不利于夹杂物上浮;死区比例较大,不利于成分和温度的均匀。

(2)使用湍流控制器阻止了钢液直接流向水口,避免了短路流,保护了水口不受冲刷并且都能显著降低中间包内的死区比例,该方法简单易行,但对最小停留时间的延长有限。

(3)使用导流槽和低坝可以增加钢水注入点与中间包出口的距离,同时可以使钢水经过较大的循环才能到流口水口,从而显著延长了钢水在中间包内的停留时间,促进夹杂物上浮。

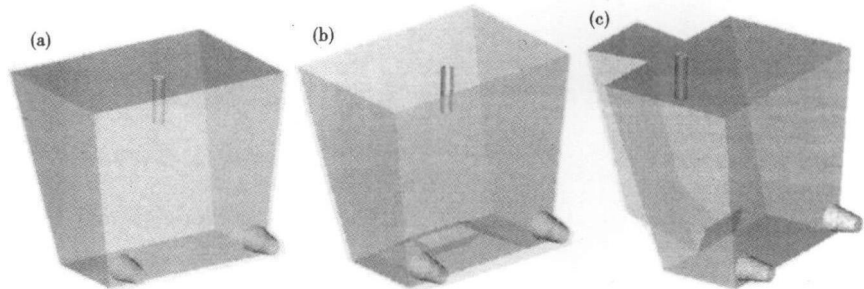


图1 3种中间包水模型实验方案:(a)原型中间包;(b)底部加设湍流控制器;(c)使用导流槽和低坝

Fig. 1 Test scheme of three tundish water model: (a) original tundish; (b) tundish with a turbulence inhibitor at bottom; (c) tundish with a inlet launder and low dam

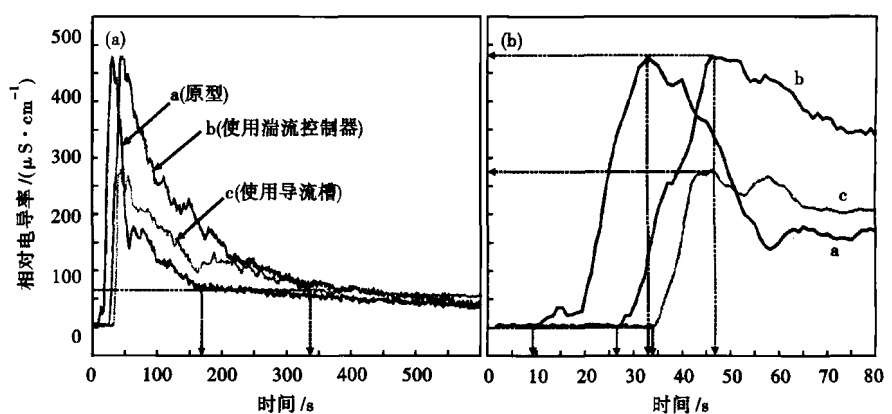


图2 水模型实验中测量的RTD曲线

Fig. 2 Residence time distribution curves measured in test of water modeling

表2 3种方案试验测量得到的停留时间和各流动模式所占的体积分数  
Table 2 Measured residence time in tundish and each flow mode amounting to volume percent of total volume in test for 3 schemes

| 方案        | 滞止时间<br>( $t_{min}$ )/s | 峰值时间<br>( $t_{max}$ )/s | 实际平均<br>停留时间/s | 理论平均<br>停留时间/s | 流动模式/% |       |       |
|-----------|-------------------------|-------------------------|----------------|----------------|--------|-------|-------|
|           |                         |                         |                |                | 活塞区    | 死区    | 全混区   |
| a(原型)     | 9                       | 33                      | 798            | 1 347          | 1.60   | 40.70 | 57.70 |
| b(加湍流控制器) | 27                      | 47                      | 876            | 1 347          | 2.00   | 32.97 | 65.03 |
| c(加导流槽)   | 35                      | 47                      | 1 040          | 1 560          | 2.61   | 33.33 | 64.06 |

## 参考文献

- 1 颜慧成,丁永良,刘金刚. 去除水平连铸不锈钢中间包钢水夹杂物的水模型试验. 特殊钢,2004,25(1):12
- 2 Mazumdar D. Physical and Mathematical Modelling of Continuous Casting Tundish Systems. ISIJ International, 1999,39(6):524
- 3 Yang S. Fluid Flow and Inclusion Motion in Horizontal Continuous Casting Tundishes. MS & T Conference Proceeding, 2008:1270
- 4 Singh S, Ahuja R. Fluid Dynamics of Continuous Casting Tundishes-Physical Modeling. Ironmaking & Steelmaking, 1986,13(5):241

杨树峰(1981-),男,博士生,洁净钢研究。

收稿日期:2009-01-13